

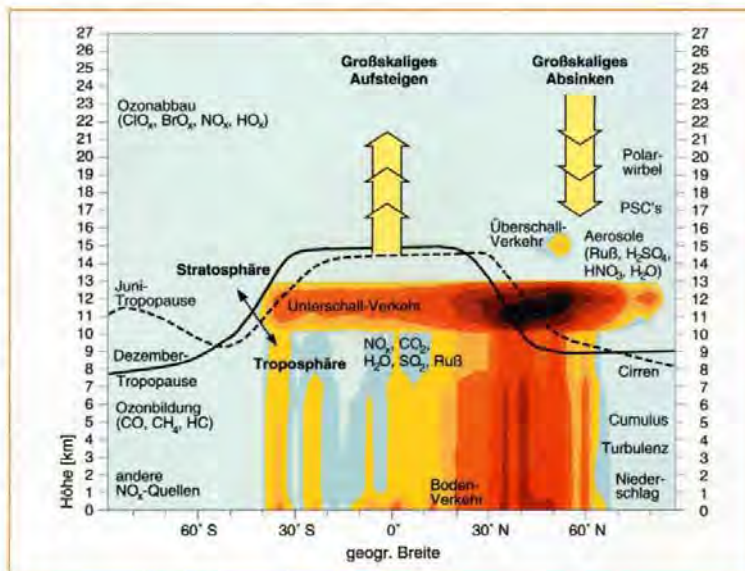
Für die moderne Zivilisation stellt der Luftverkehr einen zentralen Bestandteil der Infrastruktur dar. Die Weltwirtschaft ist auf ihn angewiesen und auch für Privatreisende stellt er ein wesentliches Hilfsmittel dar. Der Luftverkehr führt aber auch zu Emissionen von Gasen und Partikeln, die Klima und Ozonkonzentration auf regionaler und globaler Ebene beeinflussen können. Die Sorge um die Ozonschicht in der Stratosphäre und die wachsende Einsicht in die Notwendigkeit einer Reduktion von Treibhausgasen hat zu einer kritischen öffentlichen Diskussion über die Emissionen des Luftverkehrs geführt. Dem standen anfangs ungenügendes Wissen über die tatsächlichen Effekte und ihre Größe gegenüber. In einem Verbund von nationalen und internationalen Forschungsprogrammen, mit starker deutscher Beteiligung, wurden daher in den letzten Jahren die Auswirkungen der durch den Luftverkehr bedingten Emissionen auf die Atmosphäre intensiv erforscht. Das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) erstellt derzeit eine wissenschaftliche Bestandsaufnahme zu diesem Thema. Was und wieviel emittiert der globale Luftverkehr? Wie stark verändern die Emissionen die Zusammensetzung der Erdatmosphäre? Verstärkt der Luftverkehr den Ozonabbau in der Stratosphäre? Bildet er Photosmog in Ballungsräumen mit Flughäfen? Wie groß ist der Klimaeffekt? Wie kann der Luftverkehr langfristig umweltverträglicher gestaltet werden? Diese Fragen lassen sich heute sehr viel genauer beantworten als noch vor wenigen Jahren. **Abstract & Keywords** → p. 79

Wie stark beeinflussen die Emissionen des Luftverkehrs Ozon und Klima?

Ulrich Schumann*

1. Einleitung

Strahltriebwerke von Flugzeugen verbrennen Kerosin mit Luft. Die Verbrennungsprodukte werden in die Atmosphäre emittiert und verändern deren chemische und klimatische Eigenschaften. Zu diesen Emissionen gehören Gase wie Kohlendioxid, Wasserdampf, Stickoxide, Schwefelverbindungen, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe sowie Rußpartikel. Es besteht die Möglichkeit, daß die Emissionen des weltweiten Luftverkehrs Klima und Zusammensetzung der Erdatmosphäre großräumig beeinflussen. Ein großer Teil der Spurenstoffe wird von Flugzeugen im Reiseflug in Höhen zwischen 9 und 12 km im Bereich der Tropopause freigesetzt, an der Grenze zwischen oberer Troposphäre und unterer Stratosphäre (Figur 1). An der Tropopause ist die Atmosphäre relativ kalt; häufig kälter als -50°C . Oberhalb der Tropopause ist die Atmosphäre sehr trocken, darunter aber oft so feucht, daß sich Wolken bilden. Hier verursachen Flugzeuge Kondensstreifen. Im Bereich der Tropopause liegen Stickoxide in sehr



Figur 1. Mittlere Höhe der Tropopause im Winter und Sommer, Quellverteilung der Stickoxide aus dem Luftverkehr (rot im Bereich maximaler Quellstärke) und relevante Prozesse

* Postadresse: Prof. Dr. U. Schumann, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, 82230 Wessling

geringer Konzentration vor und beeinflussen unter den hier vorherrschenden Reaktionsbedingungen maßgeblich die photochemische Bildung von Ozon. Ein Anstieg der Stickoxid-Konzentration durch

Emissionen aus Triebwerken führt also an der Tropopause zu vermehrter Bildung von Ozon, das aufgrund der besonders niedrigen vorherrschenden Temperaturen vor allem hier als Treibhausgas wirkt.

Falls die Stickoxide aus dem Luftverkehr in die mittlere Stratosphäre weit oberhalb der Tropopause gelangen, könnten sie hier hingegen aufgrund der anderen vorherrschenden Reaktionsbedingungen und Stoffkonzentrationen zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht beitragen. Durch ein Maximum der Ozonkonzentration in der Stratosphäre wirkt vor allem diese als Filter für ultraviolette Strahlung. Stickoxid-Emissionen durch den Luftverkehr verstärken also einerseits den Treibhauseffekt durch Steigerung der Ozonkonzentration an der Tropopause und können andererseits auch zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht und damit einer Zunahme der ultravioletten Strahlung beitragen.

Daher haben Emissionen im Reiseflug im Bereich der Tropopause eine größere Wirkung auf Ozon und Klima als vergleichbare Emissionen in Bodennähe und es besteht Sorge, daß der derzeit mit circa 5-7 % pro Jahr anwachsende zivile Luftverkehr die Atmosphäre stärker verändert, als andere Verkehrsträger dies tun. Deswegen ist es wichtig zu wissen in welchem Ausmaß und ebenso, was man tun kann, um einen auch in Zukunft wachsenden Luftverkehr möglichst umweltverträglich zu gestalten. Dies ist zudem aus wissenschaftlicher Sicht sehr interessant, weil man über die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Atmosphäre in der Tropopausenregion vergleichsweise wenig weiß und diese generell für Wetter und Klima wichtig sind.

Die Emissionen des Luftverkehrs und ihre Auswirkungen auf den Zustand der Atmosphäre sind daher Thema einer Reihe von nationalen und internationalen Forschungsvorhaben in Deutschland, Europa und den USA. An diesen Verbundprogrammen haben Experten der Verkehrsforschung und Antriebstechnik ebenso mitgewirkt wie Atmosphärenforscher. Die Palette der Methoden umfaßt Verkehrskataster, Messungen an Triebwerken auf Prüfständen, insitu-Messungen in der Atmosphäre mit Forschungsflugzeugen, Fernmessungen vom Satelliten und vom Boden aus und physikalische, sowie chemische Modelle der Atmosphäre auf allen Skalen vom Triebwerk bis zum Globus. Zudem wurden einige der Prozesse, wie zum Beispiel das Gefrieren von Eispunkten oder chemische Reaktionen von Stickoxiden an Aerosolen im Labor untersucht. Ergebnisse einer Reihe von nationalen Forschungsprogrammen der Deutschen Forschungsgemeinschaft^[3], des Bundesministeriums für Bildung und Forschung – BMBF^[2] und der Helmholtz-Gemeinschaft^[1] wurden kürzlich der Öffentlichkeit vorgestellt. Weitergehende

Forschungen laufen derzeit am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und anderen Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungseinrichtungen (insbesondere in Jülich, Karlsruhe und Geesthacht), zudem im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte im Klima- und Umweltforschungsprogramm der Europäischen Union^[2] und bei der amerikanischen NASA^[6]. Zahlreiche Wissenschaftler aus aller Welt, mit maßgeblicher deutscher Beteiligung, erstellen gegenwärtig eine Bestandsaufnahme und Bewertung („Assessment“ und „Evaluation“) des Wissensstandes unter Leitung des IPCC. Die Studie „Aviation and the Global Atmosphere“ oder „Luftverkehr und die globale Atmosphäre“ wird 1999 erscheinen.

2. Verkehr, Treibstoffverbrauch und Emissionen

Im Jahr 1997 transportierten 13500 Strahlflugzeuge und 3200 Turboprop-Flugzeuge weltweit (ohne russische Föderation und China) 1.45 Milliarden zahlende Passagiere im Durchschnitt 1800 km weit^[12]. Nach zeitweisigem Einbruch infolge der Kuwait-Krise 1991 stieg die Transportleistung (zahlende Passagiere mal Kilometer) in den Jahren 1994 bis 1997 im Durchschnitt um 7.1 % pro Jahr. In Europa und den USA wächst der Luftverkehr von der reinen Transportleistung her gesehen am stärksten, liegt aber hier mit seiner relativen Zuwachsrates unter der globalen^[10]. Die größten Wachstumsraten werden für Strecken über dem Nordatlantik, Pazifik und in Fernost erwartet. Langfristig wird mit einem weiteren Wachstum von circa 5 % pro Jahr gerechnet. Dabei würde sich der globale Luftverkehr in 14 Jahren verdoppeln. Bis zum Jahr 2050 könnte er nach verschiedenen Szenarien um das 3- bis 9-fache^[7] oder sogar um mehr als das 20-fache^[34] zunehmen. Letzteres ist aber eher unwahrscheinlich.

Der Verbrauch an Treibstoffen (Kerosin) durch den weltweiten Luftverkehr (inklusive eines Anteils von derzeit circa 10 % für militärische Zwecke) betrug 1992 nach verschiedenen Quellen zwischen 130 und 180 Tg (Millionen Tonnen) pro Jahr, was etwa 5-6 % der Menge aller Erdölprodukte entspricht. Im zivilen Luftverkehr ist der Treibstoffbedarf von 1976 bis 1992 um circa 4-5 % pro Jahr gestiegen^[1]. Bis 2015 rechnen Experten

der Flugzeugindustrie mit Wachstumsraten von circa 3-4 % pro Jahr. Die Differenz zwischen der Zunahme des Luftverkehrs und dem Anwachsen des Treibstoffverbrauches ist eine Folge effektiverer Triebwerke, besserer Flugeigenschaften und erhöhter Auslastung der Flugzeuge, sowie des abnehmenden Anteils des militärischen Luftverkehrs. Dieser Effektivitätsgewinn wird in Zukunft aber kleiner sein. Man geht davon aus, daß der Verbrauch an Treibstoffen durch den Weltluftverkehr von 1992 bis 2015 um einen Faktor von 1.8-2.4 zunehmen wird.

Bei der Verbrennung des Kerosins mit Luft entstehen primär Kohlendioxid (CO₂) und Wasserdampf (H₂O). Bei vollständiger Verbrennung und einem Wasserstoffgehalt des Treibstoffs von circa 13.8 % Massenanteil entstehen circa 1.23 kg H₂O und 3.16 kg CO₂ je kg verbrannten Treibstoffs. Der Schwefelgehalt (S) des Treibstoffs variiert stark je nach Raffinerie und Rohöl mit durchschnittlich 400-600 ppm (Massenanteile je Millionen). Der größte Teil des Schwefels wird als Schwefeldioxid (SO₂) freigesetzt.

Wegen unvollständiger Verbrennung werden auch Kohlenmonoxid (CO), Ruß und sogenannte unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) emittiert. Bei den hohen Verbrennungstemperaturen im Triebwerk bilden sich zudem Stickoxide (NO_x), vor allem Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂). Die Masse der emittierten Stickoxide mißt man in Masseneinheiten von NO₂, die von Kohlenwasserstoffen in denen von Methan (CH₄). Der Methananteil der Verbrennungsgase ist jedoch infolge weitgehender Verbrennung eher kleiner als in der Luft am Triebwerkeintritt. Typische Emissionsindizes sind in Tabelle 1 aufgeführt^[7,9]. Die Emissionsindizes, also die Menge von emittierten Gasen pro Menge verbranntem Treibstoff, für NO_x, HC, CO und Ruß hängen stark vom Lastzustand der Triebwerke ab, das heißt ob sie unter schwacher, mittlerer oder voller Schubkraft laufen.

Aus Daten über die weltweiten Verkehrsverbindungen und die Art der eingesetzten Flugzeuge und Triebwerke, aus Leistungsrechnungen für die Flugzeuge und aus empirischen Beziehungen zwischen Emissionsindizes und Triebwerkszustand wurden globale Kataster der Emissionsverteilung ermittelt^[9,26]. Nach diesen wird ein Großteil der Emissionen

Tabelle 1. Mittlere Emissionsindizes für den globalen Luftverkehr (g/kg Emission/verbranntem Treibstoff)

| CO ₂ | H ₂ O | NO _x | SO ₂ | HC | CO | Ruß |
|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----|----|------|
| 3160 | 1230 | 14 | 1 | 1.3 | 4 | 0.04 |

Tabelle 2. Globaler Verbrauch des Treibstoffs Kerosin, mittlere Emissionsindizes und globale Emissionsraten des Luftverkehrs (1992). Werte in Klammern kennzeichnen den Wertebereich der gesamten Flotte (nach Schumann, 1994, und Fahey and Schumann, 1999).

| Stoff | Emissions-index in g/kg | Emissionsrate (1992) in (Tg)/a | Vergleichbare Emissionsrate in (Tg)/a | Vergleichbare Emissionsquelle |
|------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---|
| Kerosin | | 140 (139-170) | 3140 | Gesamtproduktion an Erdölprodukten |
| CO ₂ | 3160 | 440 (430-540) | 26000-30000 | Gesamte anthropogene Emission an CO ₂ in 1990 |
| H ₂ O | 1230 | 176 | 45 525000 | Methanoxidation in der Stratosphäre Verdunstung an der Erdoberfläche |
| NO _x | 14 (12-16) | 2 | 2.9 ± 1.4 90 ± 35 | Fluß aus der Stratosphäre Alle anthropogenen Quellen |
| Ruß | 0.04 (0.01-0.1) | 0.006 | 12 | Verbrennung fossiler Treibstoffe und Biomasse |
| SO _x | 0.8 (0.6-1) | 0.12 | 130 20-100 5.4 8.0 | Gesamte Quelle aus Verbrennung fossiler Treibstoffe Natürliche Quellen Nicht-eruptive Vulkane Eruptive Vulkane |
| CO | 4 (2-6) | 0.56 | 1500 | Gesamte anthropogene Quelle |
| HC | 0.6 (0.2-3.0) | 0.1 | 90 | Anthropogene Emissionen an der Erdoberfläche |

über Europa, den USA und dem Nordatlantik freigesetzt. Etwa 93 % werden auf der Nordhemisphäre emittiert, mehr als die Hälfte oberhalb von 8 km Höhe und circa 30% (im Winter auch mehr) oberhalb der Tropopause (Figur 1).

Tabelle 2 vergleicht die pro Jahr emittierten Massen verschiedener Abgas-Komponenten mit denen aus anderen charakteristischen Quellen. Die emittierten Massen sind durchweg sehr viel kleiner als diejenigen aus anderen Quellen am Boden. Wasserdampf, Stickoxide, Ruß, Schwefeldioxid und manche der Kohlenwasserstoffe werden rasch in andere Stoffe umgewandelt, am Boden deponiert oder mit dem Niederschlag ausgewaschen und gelangen daher nur zu einem sehr kleinen Anteil in die obere Troposphäre, während der Luftverkehr

direkt in diese empfindliche Schicht emittiert. Dadurch haben bezogen auf die gleiche Menge seine Emissionen eine relativ größere Auswirkung auf die oberen Schichten der Atmosphäre als die anderer Quellen am Boden. Für Stickoxide, Schwefelverbindungen und Wasser gibt es natürliche Quellen in der Stratosphäre und im Vergleich zu diesen ist der Beitrag des Luftverkehrs nicht unerheblich. Für Schwefelverbindungen gilt dies zumindest für Zeiten ohne starke Vulkanausbrüche. Der Beitrag des Luftverkehrs zu den Emissionen von Kohlenmonoxid und den meisten Kohlenwasserstoffen (insbesondere Methan) ist aufgrund der relativ großen Verweildauer und großen Quellen am Boden gering. Der Beitrag der Emissionen von Stickoxiden, Wasserdampf, Partikeln und Kohlendioxid zu Verände-

rungen der Atmosphäre wird im folgenden diskutiert.

3. Stickoxide und Änderungen von Ozon und Methan

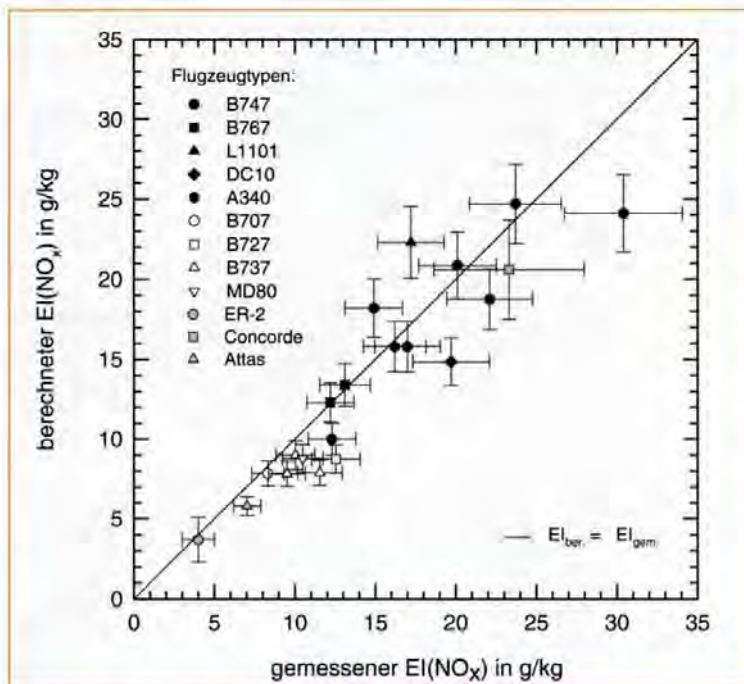
Im Mittelpunkt der Forschung standen zunächst die Stickoxide. Diese beeinflussen die Photochemie der Atmosphäre. Stickoxide aus dem Luftverkehr standen im Verdacht, den beobachteten Ozonverlust in der Stratosphäre zu verstärken.

Der Emissionsindex für Stickoxide (NO_x) konnte anfänglich nur geschätzt werden, da er stark von der Flughöhe und dem Lastzustand abhängt. Die Emission im Reiseflug mußte berechnet werden, wobei die Daten zur Überprüfung solcher Rechnungen fehlten. Meßwerte lagen anfänglich nur für den Betrieb am Boden vor. Daher hat man die Emissionen auf zwei Höhenprüfständen vermessen. Die Meßdaten dienten der Anpassung der Parameter in den empirischen Beziehungen zwischen Emissionsindizes und Triebwerkszustand.

Zudem wurden die Emissionen im Reiseflug für eine Vielzahl von Flugzeugen gemessen. Dazu ist das Forschungsflugzeug Falcon (Figur 2) des DLR in Entfernungen von 100 m bis etwa 50 km hinter den Verkehrsflugzeugen direkt in die Abgasfahnen eingeflogen und hat dort mit speziell hierfür entwickelten Instrumenten die Konzentration an Stickoxiden und an Kohlendioxid direkt gemessen. Da man sehr genau weiß, wieviel Kohlendioxid pro verbrannter Masse Treibstoff entsteht, kann aus dem Verhältnis der gemessenen Konzentrationen unmittelbar auf den Emissionsindex, das heißt auf die Masse emittierter Stickoxide pro Masse verbrannten Treibstoffs geschlossen werden. In Figur 3 (siehe S. 22) sind die gemessenen Emissionsindizes für verschiedene Verkehrs- und Forschungsflugzeuge im Reiseflug den Rechenergebnissen der Antriebstechniker gegenübergestellt. Man sieht, daß Messung und Rechnung bis auf einen Fehler von circa 15 % übereinstimmen.



Figur 2. Das Forschungsflugzeug Falcon des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), mit dem Messungen direkt in den Abgasfahnen von Verkehrsflugzeugen durchgeführt werden.



Figur 3. Berechnete und gemessene Werte des Emissionsindex für Stickoxide von verschiedenen Flugzeugen (mit verschiedenen Triebwerken und Flugbedingungen) im Reiseflug

men^[20]. Auch zeigt sich, daß der Emissionsindex des Überschallflugzeuges Concorde, der von amerikanischen Kollegen gemessen wurde, in die gleiche Größenordnung fällt wie die moderner Unterschallflugzeuge.

Der Emissionsindex moderner Großraumflugzeuge ist größer als der älterer oder kleinerer Flugzeuge. Sie emittieren also mehr Stickoxide pro verbrannter Treibstoffmenge. Das liegt daran, daß die modernen Triebwerke ein höheres Bypass-Verhältnis verwenden, was den Treibstoffverbrauch senkt, aber höhere Temperaturen und Drücke in den Brennkammern erfordert und so zu mehr Stickoxiden pro Masse Treibstoff führt. Bei gleicher Transportleistung (zum Beispiel pro Sitz und Kilometer) emittieren moderne Flugzeuge in der Regel dennoch weniger Stickoxide als die alten. Dies geht auf gezielte Veränderungen der Brennkammern mit größerer Homogenität bei der Vermischung von Treibstoff und Luft sowie gezielte Beeinflussung des Luft-Treibstoff-Verhältnisses zurück. Gegenwärtig werden neue Brennkammerkonzepte entwickelt, die in Zukunft zu geringeren spezifischen Emissionen und dementsprechend geringeren Emissionsindizes führen können. Wenn man aber die Flugzeuge mit heutiger Technik in wesentlich geringerer Flughöhe flie-

gen würde, wie es zeitweilig diskutiert wurde, emittieren sie dort wegen des größeren Luftwiderstandes mehr Kohlendioxid und wegen der höheren Temperaturen auch mehr Stickoxide. Auf diese Weise ließen sich die Emissionen also nicht verringern.

Nach den genannten Berechnungen emittierten Flugzeuge in 1992 etwa 1,9 Millionen Tonnen Stickstoffdioxid (NO_2)/a oder 0,57 Millionen Tonnen Stickstoff (N)/a, was etwa 1,8 % (1,2-2,4 %) aller Stickoxid (NO_x)-Quellen^[16] ausmacht. Im Vergleich zu den Emissionen des weltweiten Kraftfahrzeugverkehrs beträgt der Anteil des Luftverkehrs 6-7 %^[16]. Weitere Emissionen entstammen Industrie und Hausbrand am Boden, mikrobiischen Prozessen im Boden und Blitzen in Gewittern und der Stratosphäre.

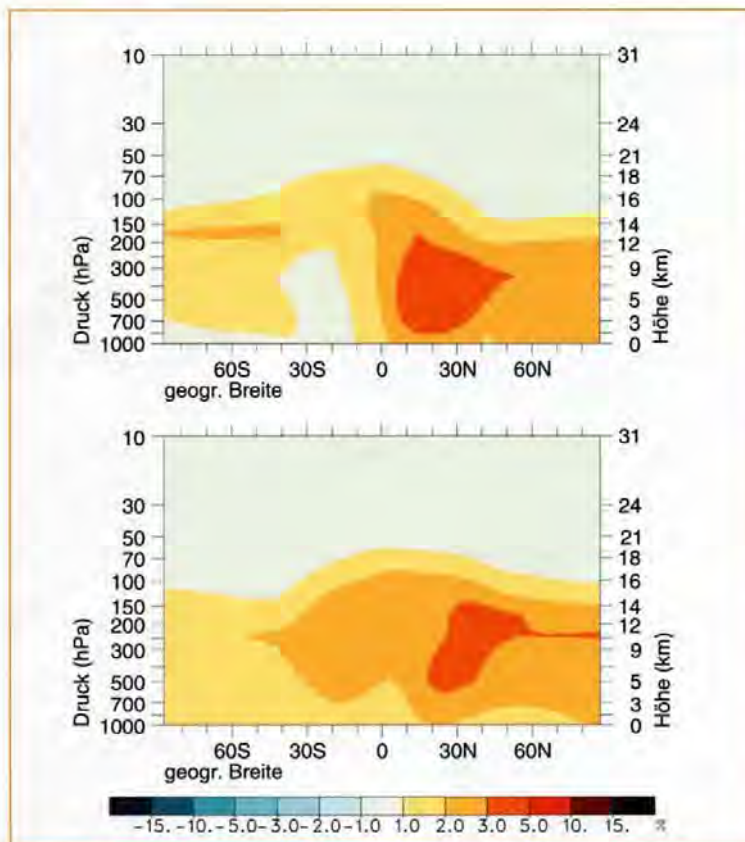
Zur Beurteilung der luftchemischen Wirkung wurden dreidimensionale Atmosphärenmodelle entwickelt, welche die Chemie und das Klima der Erdatmosphäre nachbilden. Mithilfe solcher Modelle wurde zunächst die Konzentrationsverteilung der Stickoxide berechnet. Die Modelle stützen sich dabei auf Angaben über die weltweite Emissionsverteilung aus dem Luftverkehr^[20] und aus den anderen bekannten Quellen^[16]. Die Modellrechnungen zeigten, daß der Luftverkehr die Stickoxidkonzentration im Bereich der am stärksten beflogenen Flugkorridore

deutlich erhöht. Im zonalen Mittel über alle Längengrade und über die Breiten von 40-60° nördlicher Breite wurde errechnet, daß der Luftverkehr zu den im Höhenbereich 8 bis 12 km vorhandenen Stickoxiden im Sommer ungefähr 10-30 % und im Winter etwa 30-60 % beiträgt. Die große Streubreite dieser Angaben reflektiert die immer noch großen Unsicherheiten der Modelle, der bestimmten Emissions-Mengen und der verwendeten Bezugswerte für die Stickoxid-Konzentrationen in der Atmosphäre.

Messungen mit dem Forschungsflugzeug Falcon des DLR haben gezeigt, daß der Beitrag des Luftverkehrs zur NO_x -Konzentration in der Atmosphäre nachweisbar ist. Mit neuen, hochempfindlichen Meßgeräten konnten einzelne Abgasfahnen von Verkehrsflugzeugen noch 3 Stunden nach deren Emission als deutliche Konzentrationspitzen für Stickoxide und Partikel nachgewiesen werden^[21]. Eine großräumige Zunahme der Stickoxide im Umfeld der Flugkorridore war nur fallweise für besondere Wetterlagen nachweisbar. Es wurden aber auch deutliche Verschmutzungen in Form von Schwefeldioxid, Azeton und Salpetersäuregas gefunden, die aus Quellen auf dem nordamerikanischen Kontinent stammen. Der relative Beitrag des Luftverkehrs zu Stickoxiden und anderen Spurenstoffen in der oberen Troposphäre ist daher im Vergleich zu den Emissionen aus Industrie, Hausbrand und Kraftfahrzeugen kleiner als früher angenommen.

Weiter wurden mit den Modellen die Ozonänderungen infolge der emittierten Stickoxide berechnet^[24]. Figur 4 zeigt, daß der heutige Luftverkehr die Konzentration an Ozon in allen Höhenbereichen des heutigen Luftverkehrs vergrößert. Die Stickoxide verursachen also keinen Ozonabbau, sondern im Gegenteil eine Ozonzunahme. Der Luftverkehr im Reiseflug trägt auch nicht zum Anstieg der Ozon-Konzentrationen an der Erdoberfläche bei. Nur an Flughäfen wirken die Emissionen des Luftverkehrs ähnlich wie die des Kraftfahrzeugverkehrs und können lokal Photosmog bilden. Im Umfeld von Flughäfen überwiegen jedoch zumeist die Emissionen des Zubringer- und sonstigen Kraftfahrzeugverkehrs^[11].

Eine Veränderung der Ozonkonzentration in der oberen Troposphäre aufgrund des Luftverkehrs ist meßtechnisch nicht nachweisbar. Die natürlichen Schwankungen der Ozonkonzentration und Änderungen infolge der Emissionen aus anderen Quellen am Boden, durch Vulkane und durch den chlorbedingten Ozonabbau in der Stratosphäre überdecken den Bei-



Figur 4. Ozonzunahme aufgrund des heutigen Luftverkehrs in Prozent der Ozonkonzentration (oben die Ergebnisse für Januar-Bedingungen, unten für Juli)

trag des Luftverkehrs bei weitem. Die Änderung der Ozonkonzentration läßt sich daher nur aus den Modellrechnungen ableiten. Sie erreicht in 8-12 km Höhe zwischen 30 und 60° nördlicher Breite im Mittel eine Zunahme von 1-4 % im Winter und von 4-8 % im Sommer⁽⁴⁾. Diese Zunahme wächst in erster Näherung linear mit der Menge an emittierten Stickoxiden an. Dies war zunächst nicht erwartet worden, da die Ozonbildung stark von der Konzentration der Stickoxide abhängt⁽⁵⁾, ist aber zu verstehen, wenn man beachtet, daß Ozon sich sehr großräumig bildet und auf der großen Skala der Beitrag des Luftverkehrs gegenüber anderen Emissionen so klein ist, daß ein linearer Zuwachs verständlich ist. Das zusätzliche Ozon infolge des Luftverkehrs wirkt einerseits als Treibhausgas und andererseits als UV-Filter, wodurch es die am Erdboden ankommende ultraviolette Strahlung der Sonne vermindert.

Die Stickoxide und die Ozonbildung haben einen interessanten Nebeneffekt auf die Konzentration von Methan (CH_4). Methan ist ebenfalls ein Treibhausgas.

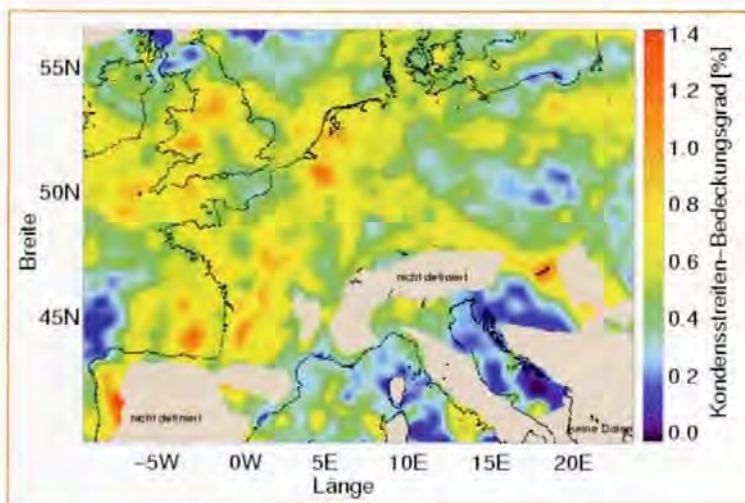
Mit den Stickoxiden und der Ozonproduktion kommt es im Flugniveau zu einer Zunahme von Hydroxylradikalen (OH). OH ist ein sehr reaktives und daher kurzlebiges Gas, das zur Oxidation unter anderem von CO und CH_4 beiträgt. Die Reaktion von OH mit CH_4 ist aber in der oberen, kalten Atmosphäre sehr träge. Sie läuft sehr viel schneller in der warmen, unteren Troposphäre ab. Das zusätzliche OH im Bereich der Flugkorridore hat wenig direkten Einfluß auf CH_4 , vermindert dort aber das CO. Wegen der großen Lebensdauer von CO (einige Monate) macht sich die zusätzliche CO-Senke im Flugniveau nach einiger Zeit auch als Abnahme der CO-Konzentration in der unteren Troposphäre bemerkbar. Wegen des verminderten CO wird dort weniger OH durch CO verbraucht und kann statt dessen mehr CH_4 abbauen und so dessen Treibhauseffekt vermindern. Dieser indirekte Effekt war qualitativ schon lange bekannt, wurde aber erst im Rahmen der Arbeiten für das IPCC-Assessment in seiner quantitativen Bedeutung erkannt. Man rechnet damit, daß der heutige Luftverkehr den

Abbau von CH_4 um circa 2-3 % verstärkt. Dadurch wird der durch die Stickoxid-Emissionen des Luftverkehrs bedingte Treibhauseffekt um etwa 50 bis 80 %, also auf rund die Hälfte bis ein Viertel vermindert. Da CH_4 eine Lebensdauer von circa 9 Jahren hat, wird die Minderung des Methans global spürbar. Dagegen hat Ozon in der Tropopausenregion nur eine Lebensdauer von einigen Wochen bis Monaten. Der Ozonzuwachs durch den Luftverkehr breitet sich dementsprechend global weniger gleichmäßig aus als die Abnahme des CH_4 .

Die Stickoxid-Emissionen führen also zu einem Zuwachs des Treibhausgases Ozon vorwiegend in der Tropopausenregion der nördlichen mittleren Breiten und, was bisher nicht bekannt war, gleichzeitig zu einer nahezu global feststellbaren deutlichen Verminderung des Treibhausgases CH_4 .

4. Wasserdampf, Partikel und Wolkenbildung

Als Hauptverbrennungsprodukt entsteht in den Triebwerken auch Wasserdampf. Grundsätzlich ist auch Wasserdampf ein Treibhausgas. Die vom heutigen Luftverkehr emittierten Mengen sind jedoch zu klein, um eine wesentliche direkte Klimawirkung als Treibhausgas zu entfalten⁽²¹⁾. Allerdings kondensiert der Wasserdampf auf Partikeln im Abgasstrahl und bildet so die häufig sichtbaren Kondensstreifen. In trockener Umgebungsluft bilden sich kurzlebige Kondensstreifen, die sich nach wenigen Minuten auflösen und so keine nennenswerte direkte Auswirkung auf das Klima haben. Oft ist die Atmosphäre aber sehr feucht. Die Feuchte kann die Eissättigung übersteigen, ohne daß sich dann bereits auf natürliche Weise Eispartikel und Cirruswolken bilden. Erst wenn hier ein Flugzeug lokal die Luft mit Wasserdampf übersättigt und mit den emittierten Partikeln zusätzliche Kondensationskeime bietet, bilden sich im Nachlauf kleine Wassertropfen, die rasch gefrieren, weiteres Wasser aus der feuchten Umgebung aufnehmen und so neue Cirruswolken bilden⁽²⁰⁾. Der Luftverkehr stößt also die Bildung zusätzlicher Bewölkung an. Dabei kommt es weniger auf die emittierte Wassermenge sondern mehr auf die Zahl der gebildeten Eispartikel an. Die Wolken sind in der Regel sehr dünn und lassen daher das Sonnenlicht nahezu ungehindert zum Boden gelangen, vermindern aber schon bei kleinem Eisgehalt die Abstrahlung von Erdwärme in den Weltraum. Durch letz-



Figur 5. Aus Satellitenbildern im Laufe eines Jahres bestimmter mittlerer mittäglicher Bedeckungsgrad in Prozent der bedeckten Erdoberfläche von linienförmigen Kondensstreifen über Mitteleuropa.

teres verstärkt der Luftverkehr wiederum den Treibhauseffekt.

Dieser Effekt ist im Prinzip seit langem bekannt. Offen war das quantitative Ausmaß der dadurch bewirkten Erwärmung. Diese nimmt mit der Fläche zu, die von Kondensstreifen bedeckt ist. Sie hängt zudem von der Dicke der Wolken ab, genauer von der optischen Dicke (Transmission von Strahlung wird für eine optische Dicke τ um den Faktor $\exp(-\tau)$ vermindert). Die optische Dicke wächst mit der geometrischen Dicke und dem Eiswassergehalt der Wolken. Sie ist um so größer, je kleiner die Eispartikel sind und hängt zudem von der Form der Partikel und der Wellenlänge der Strahlung ab. Nachts wirken Kondensstreifen stets erwärmend, tags kann die solare Abkühlung im Schatten der Wolken die Erwärmung im Infraroten überwiegen. Für Kondensstreifen, die etwa 5-60 Minuten alt sind, hat man eine optische Dicke von 0.1-0.5 im solaren Spektralbereich gemessen^[14].

Der Bedeckungsgrad wurde mit Hilfe von Satellitendaten bestimmt. Dazu wurden Verfahren entwickelt, die Kondensstreifen von anderen Wolken anhand ihrer linienförmigen Struktur im Satellitenbild automatisch unterscheiden. Danach bedecken Kondensstreifen über Mitteleuropa im Jahresmittel zumindest 0.5 % der Erdoberfläche, siehe Figur 5. Nachts ist der Flächenanteil der Kondensstreifen etwa einen Faktor drei kleiner als am Tag^[17]. Zum Vergleich, natürliche dünne Cirren bedecken im Mittel 20-40 % der Erdoberfläche.

Aufgrund der Temperatur- und Feuchteverteilung in der oberen Troposphäre

und der globalen Verteilung des Luftverkehrs kann man die globale Verteilung der Kondensstreifen aus diesen Beobachtungen hochrechnen^[24]. Man erwartet, daß Kondensstreifen heute etwa 0.1 % (möglicherweise 0.03-0.2 %) der globalen Erdoberfläche im Mittel bedecken. Dies ist jedoch nur eine untere Schranke der tatsächlichen Bewölkung, da der Luftverkehr auch Wolken bildet, die im Satellitenbild nicht mehr als linienförmige Kondensstreifen erscheinen.

Im Rahmen des IPCC wurden langjährige Bodenbeobachtungen und Satellitendaten von Cirren ausgewertet. Während die globale Fläche aller Wolken sich nur wenig ändert, haben Cirren in den letzten zwei bis drei Jahrzehnten regional um bis zu 4 % an Bedeckungsgrad zugenommen, insbesondere in den Regionen, in denen aufgrund der Modelle mit mehr als 0.5 % Bedeckung durch Kondensstreifen zu rechnen ist. Diese Daten sind nur begrenzt beweiskräftig, deuten aber an, daß die zusätzliche Bewölkung infolge von Luftverkehr global heute bereits 0.3 % ausmachen kann. Dieser Wert ist sehr unsicher. Er stellt eine erste Schätzung der Obergrenze der durch Luftverkehr bedingten zusätzlichen Bewölkung dar.

Die vom Luftverkehr verursachte zusätzliche Bewölkung in Form dünner Cirren erwärmt die Troposphäre. Dies ist inzwischen durch Modellrechnungen gesichert. Für einen Bedeckungsgrad von 0.1 % und eine geschätzte mittlere optische Dicke von 0.3 beträgt der Treibhauseffekt, das heißt der zusätzliche Strahlungsantrieb am Oberrand der Erdatmo-

sphäre circa 0.02 W/m^2 ^[18], siehe Tabelle 3. Die Kondensstreifen führen so zu einer sehr langsamen, nicht meßbaren, globalen Erwärmung der Erdatmosphäre unterhalb der Cirren. Kondensstreifen über warmem und hellem Untergrund haben eine höhere Klimawirkung also solche über kalten und dunklen Flächen und Kondensstreifen in subtropischen Regionen wärmen mehr als in Polarregionen. Unter Cirren wird es tags nicht ganz so warm und nachts nicht ganz so kalt wie unter klarem Himmel, was nicht unbedingt schädlich ist. In Regionen mit dauerhaften zusätzlichen Cirren infolge der Flugzeuge kann die Amplitude des Tagesganges der Temperatur um bis zu einem Grad vermindert werden. Solche Fälle treten aber sicher sehr selten auf.

Mit wachsendem Luftverkehr werden Kondensstreifen häufiger^[10]. Es wird erwartet, daß der Luftverkehr (gemessen in Zahl der Flugzeuge pro Flächen- und Zeiteinheit) besonders in der oberen Troposphäre durch Mittel- und Langstreckenflüge stark zunimmt. Moderne Triebwerke haben einen höheren Wirkungsgrad, was zwar zu einer Verminderung des Treibstoffverbrauchs führt, aber gleichzeitig zu kälteren Abgasen bei gleichem Wassergehalt. Diese können Kondensstreifen auch in wärmerer Umgebungsluft auslösen und damit sind Kondensstreifen auch auf bis zu 700 m tieferen Flugniveaus zu erwarten. Damit wächst der Flächenanteil an zusätzlicher Bewölkung. Zudem haben Kondensstreifen in niedrigeren Höhen einen größeren Wassergehalt und sind daher in stärkerem Maße strahlungswirksam. Wollte man Kondensstreifen vermeiden, so müßte man ober- oder unterhalb der kalten und feuchten Regionen der oberen Troposphäre fliegen.

Nach einem Szenario für das Jahr 2050 ist im Vergleich zu 1992 mit einem 6-fachem des Verkehrs (Personen-Kilometer), 3.2-fachem des Treibstoffverbrauchs insgesamt und 4.3-fachem an Treibstoffverbrauch oberhalb einer Flughöhe von 7 km zu rechnen. Zudem mit einem um das 5.4-fache höheren Bedeckungsgrad und einem circa 6-fachen der Strahlungswirkung von Kondensstreifen^[10,18]. Bei diesen Rechnungen sind Änderungen der Bedeckung mit Kondensstreifen aufgrund anderer Klimaänderungen nicht berücksichtigt.

Die optische Dicke der Kondensstreifen und der neu gebildeten Cirren hängt von der Zahl der gebildeten Eispartikel ab. Die Bildung von Partikeln wird wesentlich durch die Abgabe der Flugzeuge beeinflusst^[20,15,27]. Die Triebwerke emittieren Rußpartikel und Gase, aus denen ein

Aerosol von fein verteilten kleinen Partikel entsteht, wie Schwefeltrioxid (SO_2), Schwefelsäure (H_2SO_4) und Salpetersäure (HNO_3). Direkte Messungen von Schwefelsäure im Abgas haben gezeigt, daß nur circa 0.5-3 % Prozent des Schwefels aus den Treibstoffen in Schwefelsäure umgewandelt werden^[1]. Indirekte Messungen im Abgasstrahl anderer Flugzeugtypen wiesen auf Umwandlungen von mehr als 20 % hin. Diese Unterschiede sind bisher nicht erklärt und deuten auf Unterschiede in der SO_2 -Bildung zwischen Brennkammer und Triebwerksende hin. Messungen und Modellrechnungen mit Nukleationsmodellen haben gezeigt, daß pro kg Treibstoff etwa 10^{15} Rußpartikel mit einem mittleren Radius von circa 30 Nanometern emittiert werden und mehr als 10^{16} flüssige Tröpfchen neu aus den Gasen entstehen^[13]. Die Partikel können die Chemie und das Klima in komplexer Weise modifizieren. An der Oberfläche graphitischen Rußes wird Ozon abgebaut und Stickoxidverbindungen werden in eine chemisch stärker reaktive Form überführt. In der Stratosphäre werden an Schwefelsäuretröpfchen anorganische Chlorverbindungen zu Chloroxid aktiviert, was den Ozonabbau prinzipiell verstärkt. Die Partikel wirken zudem als Kondensationskeime für Wolkentröpfchen und als Gefrierkerne für Eiskristalle. Vermutlich sind große Rußpartikel mit Schwefelsäurebelag die besten Eiskristallkerne. Man weiß dies aber bisher nicht ausreichend und kann daher die Wirkung der Partikel auf Ozon und Klima noch nicht abschließend beurteilen. Partikel lassen sich durch schwefelarme Treibstoffe und rußarme Triebwerke zumindest vermindern. Ganz vermeiden kann man Kondensstreifen damit aber nicht, da die Umgebungsluft immer genügend Kondensationskerne für die Bildung von Tropfen enthält.

Kondensstreifen, Aerosole und ihr Beitrag zu einer veränderten Cirrus-Bewölkung stehen daher zunehmend im Mittelpunkt der Forschung zu den Auswirkungen des Luftverkehrs auf die Atmosphäre.

5. Kohlendioxid und Treibhauseffekt

Kohlendioxid (CO_2) ist ein Treibhausgas mit sehr langer Verweildauer in der Atmosphäre. Von zwei emittierten CO_2 -Molekülen kann eines auch nach 100 Jahren noch in der Atmosphäre wirksam sein. Das emittierte CO_2 hat daher viel Zeit, sich gleichmäßig über die Atmo-

sphäre zu verteilen und entfaltet seinen Treibhauseffekt unabhängig davon, ob es am Boden oder im Reiseflug emittiert wird. Der Treibhauseffekt entsteht durch Gase oder Partikel in der Atmosphäre, die terrestrische Strahlung absorbieren aber nur einen Teil davon in den Weltraum emittieren. Eine Zunahme dieser Gase oder Partikel bewirkt eine Zunahme des nach unten gerichteten Netto-Strahlungsflusses am Oberrand der Atmosphäre bei sonst konstanten Bedingungen. Die Atmosphäre paßt sich dieser Störung, zum Beispiel durch Temperaturänderung solange an, bis der Strahlungshaushalt wieder ausgeglichen ist. Der bisherige anthropogene Treibhauseffekt aufgrund der Änderung aller Treibhausgase, des Ozons und der Aerosole insgesamt wird auf circa 1.4 W/m^2 geschätzt^[13], siehe Tabelle 3. Bis 2050 kann dieser Beitrag auf 2.4 W/m^2 ansteigen, was jedoch stark von dem jeweils unterstellten Szenario abhängt. Pro W/m^2 zusätzlichem Strahlungsfluß rechnet man im Klimagleichgewicht mit circa $0.3\text{-}0.5 \text{ K}$ höherer Temperatur am Boden^[13].

Der Luftverkehr emittiert zur Zeit etwa 1.7 % (1.6-2.2 %) aller zusätzlichen, vom Menschen verursachten Kohlendioxide von circa 26 bis 30 Pg (Milliarden Tonnen) pro Jahr^[13]. Der Anteil des Luftverkehrs ist kleiner als noch vor kurzem geschätzt^[29]. Der relative Anteil wächst jedoch. Zudem wird ohne Reduktion der Summe aller CO_2 -Emissionen aus allen Quellen die Konzentration an CO_2 in der Atmosphäre weiter stark ansteigen. Deshalb ist auch der CO_2 -

Beitrag des Luftverkehrs klimarelevant. Die CO_2 -Emissionen des Luftverkehrs entsprechen 10-14 % der Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs^[19].

Für gegebene Szenarien^[17,35] des zukünftigen Luftverkehrs und seiner Emissionen läßt sich mit Klimamodellen ausrechnen, wie stark sich die globale mittlere Temperatur an der Erdoberfläche aufgrund der verschiedenen Beiträge des Luftverkehrs ändern kann^[23]. Für die heutige CO_2 -Konzentration und die daraus resultierende Temperaturänderung muß man den Treibstoffverbrauch in der Vergangenheit kennen, weil sich CO_2 über Jahrzehnte in der Atmosphäre ansammelt und weil auch das thermisch träge Atmosphären-Ozean-System erst allmählich auf den Effekt der Treibhausgase reagiert. Der bisherige Luftverkehr hat die Konzentration des CO_2 in der Atmosphäre bis 1990 um etwa 1-1.5 ppm erhöht, was 1.2-1.9 % des seit 1800 beobachteten Anstiegs ausmacht. Der zugehörige Treibhauseffekt hat nach den Ergebnissen des IPCC im Jahr 1990 circa 0.016 W/m^2 ausgemacht (siehe Tabelle 3), nach anderen Rechnungen 0.024 W/m^2 ^[22]. Dieser Anstieg hat die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche bis heute um circa 0.004 K ($0.002\text{-}0.006 \text{ K}$) erhöht. Im Vergleich zu dem sonst geschätzten Temperaturanstieg von circa $0.3\text{-}0.6 \text{ K}$ seit 1800 ist dies sicher ein sehr kleiner Wert. Nach einem Referenzszenario des IPCC ist bis zum Jahr 2050 mit einem Wachstum des Treibstoffverbrauchs gegenüber 1992 um den Faktor 3.7 und mit einer Zunahme der

Tabelle 3. Treibhauseffekt (Änderung des Strahlungsflusses am Oberrand der Troposphäre) aller Emissionen (IPCC, 1996, IS92a) und der des Luftverkehrs, wie sie zur Zeit für das IPCC Assessment „Aviation and the Global Atmosphere“ diskutiert werden (M. Prather und R. Sausen, persönliche Mitteilung, 1999).

| nach IPCC (1996) für Szenario IS92a in W m^{-2} | | |
|---|-------------|-------------|
| Jahr | 1990 | 2050 |
| Kohlendioxid, CO_2 | 1.54 | 3.83 |
| Methan, CH_4 | 0.47 | 0.83 |
| „Lachgas“, N_2O | 0.14 | 0.36 |
| alle Treibhausgase | 2.64 | 5.76 |
| Aerosole (direkt und indirekt) | -1.26 | -1.94 |
| Summe | 1.4 | 3.8 |
| für Emissionen des Luftverkehrs gemäß Szenario FESGa/IS92a in W m^{-2} | | |
| Jahr | 1992 | 2050 |
| Kohlendioxid, CO_2 | 0.018 | 0.074 |
| Ozon aus NO_x , O_3 | 0.024 | 0.060 |
| Methanabbau wegen NO_x , CH_4 | -0.014 | -0.045 |
| Wasserdampf, H_2O | 0.0015 | 0.004 |
| Kondensstreifen | 0.02 | 0.1 |
| Sulfat-Aerosol | -0.003 | -0.009 |
| Ruß | 0.003 | 0.009 |
| Indirekter Wolkeneffekt | | unbekannt |
| Summe | 0.05 | 0.19 |

CO₂-Konzentration in der Atmosphäre von 6 ppm (2,8 % der dann zu erwartenden CO₂-Zunahme) zu rechnen. Der Treibhauseffekt würde dabei von 0,02 W/m² in 1992 auf 0,08 W/m² in 2050 ansteigen, wobei die Temperatur bis zum Jahr 2050 im globalen Mittel um 0,03 Grad ansteigen könnte.

Im Gegensatz zu dem langlebigen CO₂, muß man beim Ozon und den Kondensstreifen globale und regionale Änderungen unterscheiden. Die berechnete Zunahme der Temperatur infolge des zusätzlichen Ozons aus dem Luftverkehr ist im globalen Mittel um einen Faktor eins bis fünf größer⁽²³⁾ als infolge des vom Luftverkehr emittierten CO₂. Das verminderte Methan kann einen Teil der globalen Temperaturerhöhung ausgleichen. Regional ist der Ausgleich durch Methan aber gering. In mittleren nördlichen Breiten ist eine Erwärmung infolge des Ozons aus den Stickoxiden des Luftverkehrs um mehr als 0,1 Grad im Jahr 2050 nicht auszuschließen⁽²⁴⁾. Der Beitrag der Kondensstreifen im globalen Mittel ist am wenigsten genau bestimmt, kann aber etwas größer sein als der infolge der CO₂-Emissionen. Eine systematische Änderung der Temperatur am Boden infolge des Luftverkehrs ist vermutlich nicht meßbar, da die durch den Luftverkehr bedingte Änderung im Verhältnis zu den natürlichen Schwankungen der Temperatur viel zu klein ist. Sie ist dennoch vorhanden und wächst.

6. Schlußfolgerungen

Luftverkehr belastet einerseits die Umwelt und das Klima, ist andererseits von großer wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Bedeutung.

Die Emissionen des Luftverkehrs sind global zu betrachten. Die Stickoxide aus den Triebwerken der Verkehrsflugzeuge bewirken, daß die Ozonkonzentration in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre im mittleren nördlichen Breiten, wo die meisten Flugzeuge fliegen, um einige Prozent zunimmt. Die Ozonsäule (Integral der Konzentration über die Höhe) wächst dadurch um bis zu 0,5 %. Entsprechend wird die am Boden ankommende ultraviolette Strahlung von der Sonne geringfügig vermindert. Der globale Luftverkehr ist weder verantwortlich für eine Ausdünnung der stratosphärischen Ozonschicht noch führt er zu einer wesentlichen Ozonproduktion in Bodennähe. In der Nähe von Flughäfen bewirken Flugzeuge einen Beitrag zur Bildung von Photosmog. Dieser Beitrag ist aber räumlich begrenzt

und oft kleiner als der durch Emissionen der Kraftfahrzeuge im Umfeld.

Ozon an der Tropopause wirkt als Treibhausgas. Die Prozesse, die zur Ozonproduktion führen, erhöhen andererseits aber auch den Abbau des Treibhausgases Methan. Dadurch wird die globale Klimastörung, die auf die erhöhte Ozon-Produktion durch die Stickoxide aus dem Luftverkehr zurückgeht, wieder vermindert. Aufgrund der unterschiedlichen Lebensdauern und Verteilung der verschiedenen Gase, kann das verminderte Methan den Klimaeffekt des zusätzlichen Ozons auf globaler Ebene teilweise ausgleichen, nicht aber regional.

Der durch die Gesamtheit der Emissionen des Luftverkehrs bewirkte Anstieg des globalen Treibhauseffekts ist klein. Er beträgt etwa 3-4 % der Treibhauseffekte aller durch menschliche Aktivitäten verursachten Emissionen seit Mitte des letzten Jahrhunderts. An dem auf die Emissionen des Luftverkehrs zurückgehenden Treibhauseffekt haben die Emissionen an Kohlendioxid aus Triebwerken einen relativ geringen Anteil. Der Treibhauseffekt aller Emissionen des Luftverkehrs ist jedoch etwa dreimal größer (möglicherweise 2-4-mal größer) als der aufgrund der Emissionen von Kohlendioxid aus Triebwerken allein. Wichtige Beiträge stammen hierbei außer von den Stickoxiden insbesondere von den Kondensstreifen. Dabei ist der Effekt einer veränderten Cirrusbewölkung infolge der emittierten und gebildeten Partikel (Ruß, Schwefelverbindungen, Wasserdampf und andere) noch nicht berücksichtigt. Die direkten Treibhauseffekte von Wasserdampf und der aus Ruß und Schwefelsäure bestehenden Aerosole ist im Vergleich dazu klein. Tatsächlich sind die Wirkungen infolge der veränderten Cirruswolken noch weitgehend unerforscht. Wenig weiß man zudem über die regionalen Klimawirkungen, die vorwiegend in nördlichen mittleren Breiten zu erwarten sind.

Die Emissionen des Luftverkehrs entsprechen etwa 10-14 % der Kohlendioxide und 6-7 % der Stickoxide aus dem globalen Kraftfahrzeugverkehr. Zum Vergleich mit anderen Verkehrssystemen genügt aber das Wissen über die relativen Anteil an den Emissionen nicht. Inzwischen kennt man die Klimawirkungen der Emissionen des Luftverkehrs besser als die der Kraftfahrzeuge. Ähnliches gilt für die Emissionen anderer Verkehrssysteme wie zum Beispiel der Weltschifffahrt.

Wegen der großen Bedeutung für Wirtschaft und den Lebensstandard der

Menschen ist die Bereitschaft der Gesellschaft, durch staatliche Eingriffe in den Luftverkehr dessen Zuwachs zu verlangsamen oder spezielle Emissionen zu begrenzen, international gering. Generell überwiegt die Meinung, daß der Klimaeffekt des Luftverkehrs klein sei, und das ist absolut gesehen ja auch richtig. Mit dem gleichen Argument könnte man aber auch den Klimaeffekt des Kraftfahrzeugverkehrs in ganz Europa als klein abtun. Zudem wächst der relative Anteil der Emissionen des Luftverkehrs im Vergleich zur Gesamtheit der Emissionen. Teile der Gesellschaft in Deutschland und in Europa befürworten daher eine Kerosin-Steuer oder emissionsabhängige Abgaben. Für die deutsche Luftfahrtindustrie könnten Regelungen akzeptabel sein, die keine Verzerrung des internationalen Wettbewerbs mit sich bringen. In Zeiten globaler Märkte sind regionale Eingriffe in der Regel jedoch von wirtschaftlichem Nachteil für die betroffene Region. In Ländern, die aufgrund ihrer Größe, Infrastruktur, Abhängigkeit vom Tourismus oder Exportindustrie besonders auf den Luftverkehr angewiesen sind, werden Steuern und Abgaben auf den Luftverkehr überwiegend abgelehnt. Wegen des geringen Anteils von circa 10-25 % der Treibstoffkosten an den Betriebskosten würde sich eine Kerosin-Steuer nicht proportional auf den Preis eines Tickets auswirken. Der Effekt einer Steuer auf das Verkehrsvolumen wird im Rahmen des IPCC diskutiert, ist aber nur ungenau bekannt. Höhere Treibstoffpreise würden zumindest die Optimierungskriterien verschieben und technische Maßnahmen attraktiver werden lassen, die bei höheren Treibstoffkosten wirtschaftlicher wären. Emissions-Abgaben geben dann einen sinnvollen Anreiz zur Verbesserung der Technik, wenn sie die Umweltwirkungen der verschiedenen Emissionskomponenten angemessen berücksichtigen. Daß dies schwierig ist, zeigt die Neubewertung der Wirkung der Stickoxide aus Luftverkehr auf das Klima aufgrund des Methan-Effektes. Auf der anderen Seite gibt es für wesentliche technische Neuerungen zur Begrenzung der Emissionen bei wachsendem Luftverkehr, außer vielleicht beim Treibstoffverbrauch, keinen wirtschaftlichen Anreiz. Will man die Klimaänderung vermeiden, so muß man hier also regelnd eingreifen oder für mehr Einsicht der Beteiligten sorgen. Vielleicht trägt dieser Aufsatz zu solchen Einsichten bei.



Ulrich Schumann: Geboren 1945 in Halle. Aufgewachsen in Rinteln/Weser. Studium des theoretischen Maschinenbaus (Strömungsmechanik, Verfahrenstechnik, Numerische Mathematik) an der TU Berlin. Wissenschaftlicher Mitarbeiter 1969 bis 1982 am Forschungszentrum Karlsruhe. Promotion 1973 mit den ersten numerischen Simulationen turbulenter Strömungen in Röhren. Post-doc 1974/75 am National Center for Atmospheric Research in Boulder, Colorado, USA. Habilitation 1978 und Privatdozent an der Universität Karlsruhe. Seit 1982 Direktor des Instituts für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen bei München. Umhabilitation für Theoretische Meteorologie und seit 1986 apl. Professor an der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-

Universität. Wissenschaftlicher Koordinator eines Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft sowie der Atmosphärenforschung im BMBF/DLR-Verbundprogramm „Schadstoffe in der Luftfahrt“, sowie mehreren EU-Projekten (AERONOX, POLINAT-1 und -2, EULINOX). Hauptautor eines Kapitels des IPCC-Assessment „Aviation and the Global Atmosphere“. Mitglied der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, der American Meteorological Society, der European Geophysical Society und der American Geophysical Union. Mehr als 90 Veröffentlichungen in Fachzeitschriften.

Literaturverzeichnis

- [1] Baughcum, S.L., S.C. Henderson, and T.G. Trütz, *Scheduled Civil Aircraft Emission Inventories for 1976 and 1984: Database Development and Analysis*, NASA CR-4722 (1996).
- [2] Brasseur, G.P., R.A. Cox, D. Hauglustaine, I. Isaksen, J. Lelieveld, D.H. Lister, R. Sausen, U. Schumann, A. Wahner, and P. Wiesen: European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions. *Atmos. Env.* 32 (1998) 2327-2422.
- [3] Curtius, J., B. Sierau, F. Arnold, R. Baumann, R. Busen, P. Schulte and U. Schumann: First sulfuric acid detection in the exhaust plume of a jet aircraft inflight. *Geophys. Res. Lett.* 25 (1998), 923-926.
- [4] Dameris, M., V. Grewe, I. Köhler, R. Sausen, C. Bruhl, J.-U. Grooff and B. Steil, 1997: Impact of aircraft NO_x emissions on tropospheric and stratospheric ozone. Part II: 3-D model results. *Atmos. Env.* 32 (1998) 3185-3199.
- [5] Ehhalt, D. H., and F. Rohrer: The impact of commercial aircraft on tropospheric ozone. In „The Chemistry of the Atmosphere – Oxidants and Oxidation in the Earth's Atmosphere.“ 7th BOC Priestley Conference, Lewisburg, Pennsylvania (edited by Brandy A. R.), The Royal Society of Chemistry, Special Publication No. 170, pp. 105-120 (1994).
- [6] Fahey, D.W. and U. Schumann: *Aviation-Produced Aerosols and Cloudiness*. Chapter 3 of IPCC, Global Aviation and the Atmosphere, Cambridge Univ. Press, to appear (1999).
- [7] FESG: *Report of the Forecasting and Economic Analysis Sub-Group*, Air Transport Bureau, ICAO, 999 University Street, Montreal, Quebec, H3C 5H7, Canada (1998).
- [8] Friedl, R. (ed.): *Atmospheric effects of subsonic aircraft: Interim assessment report of the advanced subsonic technology program*. NASA Ref. Publ. 1400 (1997).
- [9] Gardner, R.M., K. Adams, T. Cook, F. Deidewig, S. Ernedal, R. Falk, E. Fleuti, E. Herms, C.E. Johnson, M. Lecht, D.S. Lee, M. Leech, D. Lister, B. Masse, M. Metcalfe, P. Newton, A. Schmitt, C. Vandenbergh, and R. Van Drimelen, 1997: The ANCAT/EC global inventory of NO_x emissions from aircraft. *Atmos. Env.*, 31 (1997) 1751-1766.
- [10] Gierens, K., R. Sausen, U. Schumann: A diagnostic study of the global distribution of contrails, Part II: Future air traffic scenarios. *Theor. Appl. Climatol.*, in press (1999).
- [11] Graf, J.: Der Beitrag des Luftverkehrs an der Schadstoffemission in der Umgebung von Flughäfen. *Schriftenreihe der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft*, Reihe B, B206, ISSN 0418-9183, Bergisch Gladbach (1998) S. 60-69.
- [12] ICAO: Annual Report of the council, cited from: *Weltluftverkehr*. Deutsche Lufthansa AG, Informationsdienst Externe Daten (CGN RWX), Köln (1998).
- [13] IPCC: *Climate Change 1995 – The Science of Climate Change* [J.H. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, 572 pp (1996).
- [14] Jäger, H., V. Freudenthaler, and F. Hornburg: Remote sensing of optical depth of aerosols and cloud cover related to air traffic. *Atmos. Env.* 32 (1998) 3123-3127.
- [15] Kärcher, B., R. Busen, A. Petzold, F.P. Schröder, U. Schumann, and E.J. Jensen: Physicochemistry of aircraft-generated liquid aerosols, soot, and ice particles. 2. Comparison with observations and sensitivity studies. *J. Geophys. Res.* 103 (1998) 17129-17147.
- [16] Lee, D.S., I. Köhler, E. Grobler, F. Rohrer, R. Sausen, L. Gallardo-Klenner, J.G. Olivier, F.J. Dentener, and A.F. Bouwman: Estimates of global NO_x emissions and their uncertainties. *Atmos. Env.*, 31, 1735-1749 (1997).
- [17] Mannstein, H., R. Meyer, and P. Wendling, Operational detection of contrails from NOAA-AVHRR-data. *Int. J. Remote Sensing*, in press (1999).
- [18] Meerkötter, R., U. Schumann, P. Minnis, D.R. Doelling, T. Nakajima, and Y. Tsushima: Radiative forcing by contrails. *Ann. Geophys.*, in press (1999).
- [19] OECD: *Motor Vehicle Pollution, Reduction strategies beyond 2010*. OECD, Paris, France, pp.133 (1995).
- [20] Petzold, A., R. Busen, F.P. Schröder, R. Baumann, M. Kuhn, J. Ström, D.E. Hagen, P.D. Whitefield, A. Baumgardner, F. Arnold, S. Bormann and U. Schumann: Near-field measurements on contrail properties from fuels with different sulfur content. *J. Geophys. Res.* 102 (1997) 29867-29880.
- [21] Ponater, M., S. Brinkop, R. Sausen, and U. Schumann: Simulating the global atmospheric response to aircraft water vapour emissions and contrails – A first approach using a GCM. *Ann. Geophys.* 14 (1996) 941-960.
- [22] Sausen, R. and U. Schumann: Estimates of the climate response to aircraft emissions scenarios. *Climatic Change*, in press (1999).
- [23] Sausen, R., B. Feneberg and M. Ponater: Climatic impact of aircraft induced ozone changes. *Geophys. Res. Lett.* 24 (1997) 1203-1206.
- [24] Sausen, R., K. Gierens, M. Ponater, and U. Schumann: A diagnostic study of the global distribution of contrails. Part I: Present day climate. *Theor. Appl. Climatol.* 61 (1998) 127-141.
- [25] Schlager, H., P. Konopka, P. Schulte, U. Schumann, H. Ziereis, F. Arnold, M. Klemm, D.E. Hagen, P.D. Whitefield, J. Ovarlez, In situ observations of air traffic emission signatures in the North Atlantic flight corridor. *J. Geophys. Res.* 102 (1996) 10739-10750.
- [26] Schmitt, A., B. Brunner: Emissions from aviation and their development over time. In: *Pollutants from Air Traffic – Results of Atmospheric Research 1992-1997*, DLR Mitteilung 97-04 (1997), S. 37-52.
- [27] Schröder, F., B. Kärcher, C. Duroure, J. Ström, A. Petzold, J.-F. Gayet, B. Strauss, P. Wendling, and A. Thomas: On the transition of contrails into cirrus clouds. *J. Atmos. Sci.*, submitted (1999).
- [28] Schulte, P., H. Schlager, H. Ziereis, U. Schumann, S.L. Baughcum, F. Deidewig, NO_x emission indices of subsonic wide-bodied jet aircraft at cruise altitude: In situ measurements and predictions. *J. Geophys. Res.* 102 (1997) 21431-21442.
- [29] Schumann, U.: On the effect of emissions from aircraft engines on the state of the atmosphere. *Ann. Geophys.* 12 (1994) 365-384.
- [30] Schumann, U., J. Ström, R. Busen, R. Baumann, K. Gierens, M. Krautstrunk, F. P. Schröder, and J. Stingl, In situ observations of particles in jet aircraft exhausts and contrails for different sulfur-containing fuels. *J. Geophys. Res.*, 101 (1996) 6,853-6,869.
- [31] Schumann, U.: Schadstoffe in der Luftfahrt – Ergebnisse internationaler Verbundforschung, HGF-Vortragsveranstaltung „Schadstoffe in der Atmosphäre“, Bonn, 26. Nov. (1997) S. 8-10.
- [32] Schumann, U., A. Chlond, A. Ebel, B. Kärcher, H. Pak, H. Schlager, A. Schmitt, P. Wendling (Eds.): *Pollutants from Air Traffic – Results of Atmospheric Research 1992-1997*, DLR-Mitteilung 97-04 (1997).
- [33] Schumann, U.: Research on the effects of aircraft and spacecraft upon the atmosphere (Editorial). *Atmos. Env.* 32 (1998) 3065-3066.
- [34] Steil, B., M. Dameris, C. Bruhl, P.J. Crutzen, V. Grewe, M. Ponater and R. Sausen, 1998: Development of a chemistry module for GCMS – First results of a multiannual integration. *Ann. Geophys.* 16 (1998) 205-228.
- [35] Vedantham, A. and M. Oppenheimer: Long-term scenarios for aviation: Demand and emissions of CO₂ and NO_x. *Energy Policy* 26 (1998) 625-641.